№ 710. – С.70–74. 8. Peleshko D., Kovalchuk A., Pelekh Y., Peleshko M. Singular decomposition in a speech signal processing. Computer Science And Information Technologies: Materials of the Vith International Scientific and Technical Conference CSIT 2001. Peleshko Lviv: Publishig House Vezha&Co, 2011. – 2011. – С.19–20. 9. Rashkevych Y., Peleshko D., Kovalchuk A., Kupchak M., Pelekh Y. Speech signal pseudo invariants. Computer Science And Information Technologies: Materials of the Vith International Scientific and Technical Conference CSIT 2001. – Lviv: Publishig House Vezha&Co, 2011. – 2011. – С.21–22. 10. Wall, Michael E., Andreas Rechtsteiner, Luis M. Rocha, "Singular value decomposition and principal component analysis". In D.P. Berrar, W. Dubitzky, M. Granzow. A Practical Approach to Microarray Data Analysis. Norwell, MA: Kluwer. – 2003. – С. 91–109.

УДК 004.31

М. Черкаський, Т. Ткачук
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра СКС

ЕФЕКТИВНИЙ ПРИСТРІЙ ЗГОРТКИ

Розглянуто способи структурного синтезу та параметричної оптимізації конвеєрного пристрою згортки на основі характеристик складності Н-моделі алгоритму. Синтезовано схему конвеєрного тракту з часовою складністю, що дорівнює часовій складності суматора.

Ключові слова: Н-модель алгоритму, алгоритм згортки, пристрій множення.

This paper describes methods of structural synthesis and parametrical optimization of pipeline device of convolution, based on characteristics of complexity of H-model of algorithm. Synthesized scheme of pipeline tract with time complexity like time complexity of full-adder.

Key words: H-model of algorithm, convolution algorithm, multiplying device.

Вступ

Пристрій згортки, що реалізує цифрову фільтрацію, є обов’язковим елементом в системах цифрової обробки сигналів (ЦОС). В процесі проектування спеціалізованих комп’ютерних систем цього напрямку основну увагу приділяють отриманню високої продуктивності. У статті це завдання пов’язується з параметричною оптимізацією характеристик складності SH-моделі комп’ютера (SH – software/hardware)[1]. Мета – отримання високої продуктивності обробки сигналів разом з оптимізацією витрат на проектування пристрою.

Основними архітектурними способами отримання високої продуктивності оброблення даних на обмеженому списку заданих алгоритмів є:

- апаратне виконання функціональних залежностей;
- конвеєризація процесу оброблення;
- використання паралелізму процесів на всіх ієрархічних рівнях системи.

Теоретичною основою побудови потужних спецпроцесорів є теорія складності апаратно-програмних та зокрема апаратно реалізованих алгоритмів. Останні досліджуються на основі Н-моделі.

H-модель алгоритму

H-модель – це п’ятірка[1]:

$$H: <A, Q, q_0, q_f, G>,$$

де A – кінцева множина символів зовнішнього алфавіту; Q кінцева множина станів ***SH***-моделі; q_0 і q_f – початковий і кінцевий стани ($q_0, q_f \in Q$); G – конфігурація апаратних засобів моделі;

$$G = (X, U),$$

де – X – множина елементарних перетворювачів; U – множина з'єднань.

Апаратні засоби містять один або декілька елементарних перетворень, пов'язаних між собою з'єднаннями. Елементарний перетворювач перетворює деяку сукупність початкових даних на сукупність кінцевих даних:

$$x_i : \{d_i\} \rightarrow \{d'_i\}$$

Таке тлумачення дає змогу на відміну від машини Тюрінга створити модель алгоритму, що передбачає в своєму складі, апаратні засоби в явній математичній формі.

Синтез пристрою згортки

Для розроблення ефективного конвеєрного пристрою визначимо такі умови:

1. Часова складність сходинки конвеєра не повинна перевищувати часову складність спрацювання одного багаторозрядного суматора;
2. Програмна складність повинна наближатися до нуля;
3. Кількість ступенів конвеєра не повинна залежати від розрядності чисел;
4. Пристрій повинен допускати ефективне суміщення з іншими алгоритмічними пристроями реконфігурованої системи, що синтезується.

Структурний синтез здійснюється за формулою згортки:

$$y_\kappa = \sum_{i=0}^{N-1} x_{k+i} b_i ;\ i,k = \overline{0 \div N-1}\ , \tag{1}$$

де $i,k = 0 – (N-1), \dots$, y_κ – κ-й відлік результату згортки; $x_{\kappa-i}$ – (κ-i) відлік реалізації випадкового процесу; b_i – i-й відлік вагової функції фільтру.

Індекс i замінений для зручності з від’ємного на додатний. Така заміна допустима, якщо змінити напрямок читання масиву $\{x\}$.

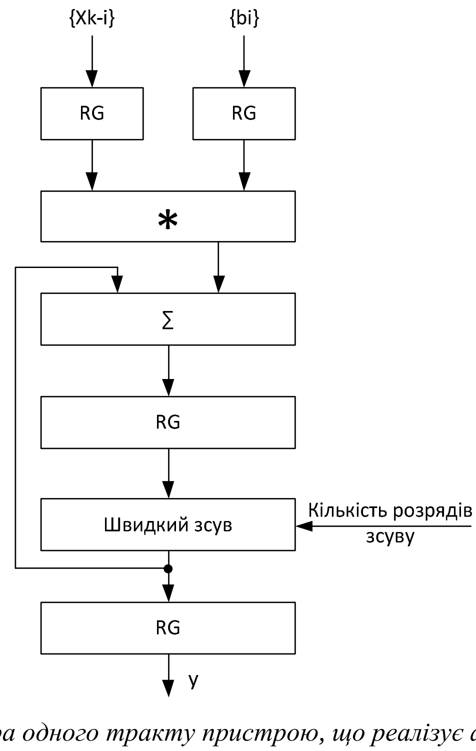


Рис. 1. Структура одного тракту пристрою, що реалізує алгоритм згортки

Результатом структурного синтезу пристрою за виразом (1) є схема (*рис. 1*). Існує достатньо поширена кількість варіантів її деталізації на рівні операційних пристроїв. Розглянемо цю схему на відповідність визначеним умовам оптимальності. Можемо побачити, що схема потребує модифікацій, щоб задовольнити умови.

Першою умовою є часова складність кожної сходинки не більша за часову складність одного багаторозрядного суматора. Головними об’єктами дослідження тут є пристрої множення і швидкого зсуву. Відомо багато варіантів схеми множення, які розрізняються за характеристиками складності, зокрема часовою. Розглянемо деякі з них, приділяючи основну увагу аналізу характеристик складності [2].

1. Пристрій множення на багаторозрядному суматорі. Такий пристрій був популярним в часи, коли апаратна складність порівняно з іншими характеристиками мала найбільшу вартісну вагу. Сьогодні його конфігурація збереглася у контролерах та вбудованих процесорах. Характеристики складності пристрою множення на багаторозрядному суматорі не задовольняють сформульовані умови: часова складність пристрою більша ніж одного багаторозрядного суматора; програмна складність не дорівнює нулю.

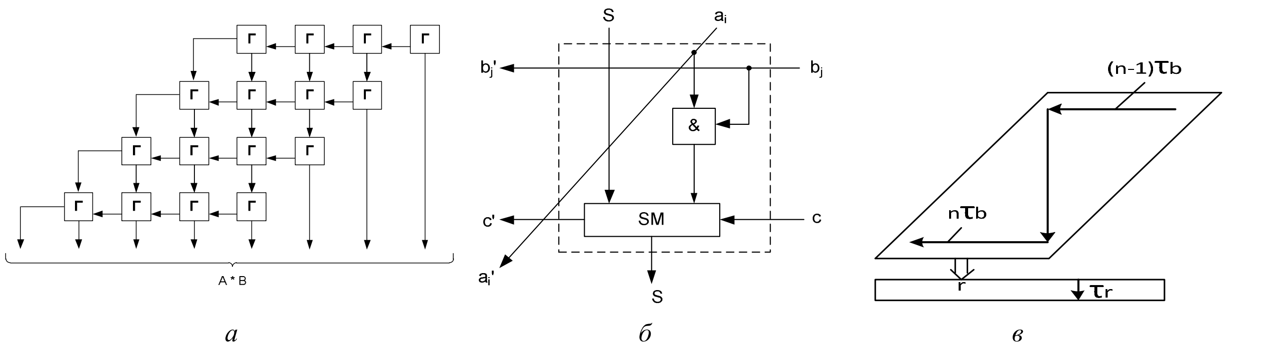
2. При векторній обробці даних з довжиною масивів, що значно перевищує довжину розрядної сітки, можливе використання систолічного пристрою множення. Така схема задовольняє першу та другу умови, а також допускає суміщення на одній структурі декількох різних операцій. Але кількість сходинок конвеєра систолічного пристрою множення залежить від кількості розрядів операндів. Тому за третьою умовою систолічну схему не можна використати.

3. Матричні пристрої множення. Такі пристрої найбільшою мірою задовольняють наші умови, крім однієї: часова складність їх більша за часову складність багаторозрядного суматора. Проаналізуємо два матричні пристрої множення: з горизонтальним та діагональним перенесенням.

Матричний пристрій множення з горизонтальним перенесенням

Цей тип перемножувача показано на *рис. 2, а*. Це комбінаційна схема, яка не потребує управління, тому її програмна складність $P=0$. Матриця складається з n^2 однорідних комірок, її апаратна складність $A=n^2$. Зв’язки між комірками однакові, тому структурна складність матриці $S=0$. Схему комірки матриці наведено на *рис. 2, б*, де S – часткова сума, b_j – розряд слова b, a_j – розряд слова a, e – перенесення на вході, e' – перенесення на виході.

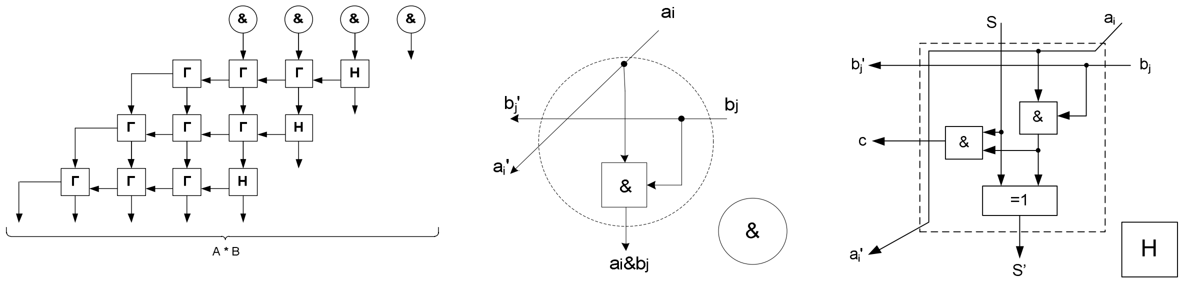
Сигнали перенесення поширюються по горизонтальних комірках матриці, сигнали часткових сум – по стовпцях. У кожній комірці утворюється сигнал логічного множення (a & b). Множина сигналів кон’юнкції утворює нульовий шар. Сигнали нульового шару згортаються у добуток за допомогою суматорів, розташованих у комірках. Один з максимальних критичних шляхів показано на *рис. 2, в*. Отже, часова складність такого пристрою $L=3n-2$.



а *б* *в*

Рис. 2. а – матричний перемножувач з горизонтальним перенесенням; б – комірка матриці; в – конфігурація перемножувача з зазначенням шляху поширення сигналу[2]

З метою зменшення часової складності вихідну матрицю (*рис. 2, а*) можна модернізувати. Вхідні комірки першого горизонтального ряду замінимо схемами кон’юнкції. Правий діагональний ряд комірок можна замінити напівсуматорами у зв’язку з тим, що на входи цих комірок не подаються сигнали перенесення. Модернізована схема, внутрішня структура комірок кон'юнкції (&) та напівсуматора (*Н*) зображені на *рис. 3*. Внутрішня структура комірки Гілда така сама, як і в попередньому випадку. В результаті такої оптимізації зменшується часова та апаратна складність, але збільшується структурна. Характеристики складності такої схеми (*рис. 3а*) такі: $P=0$, $A=n^2-n$, $L=3n-4$, $S=14$.



а *б* *в*

Рис. 3. а – оптимізований матричний перемножувач із горизонтальним перенесенням;
б – структура комірки кон'юнкції; в – структура комірки напівсуматора

Часова складність проаналізованих схем є більшою ніж час спрацювання одного багаторозрядного суматора, тому потрібно провести глибший аналіз. У матричних схемах одним із методів оптимізації може бути мінімізація довжини шляху поширення сигналу. Саме використання такого методу дало змогу отримати наступний варіант пристрою множення.

Матричний пристрій множення з діагональним переносом

Такий тип перемножувача показано на *рис. 4, а*. Його програмна складність також дорівнює нулю $P=0$. Апаратна складність $A=n^2+n$. Часова складність такого пристрою $L=2n-1$. На відміну від попередньої моделі пристрою, в структурі є дві різнотипні комірки. Їх схеми показано на *рис. 4, г, д*. Структурна складність такого пристрою $S=4.7$.

Крім того, конфігурація зв'язків матриці нерегулярна. Якщо між всіма комірками матриці сигнал перенесення поширюється у діагональному напрямку, то в останньому рядку напрямок горизонтальний. Перевагою цієї схеми є зменшена приблизно в 1,5 раза часова складність порівняно з попередньою схемою. Збільшення структурної складності дало змогу зменшити часову складність.

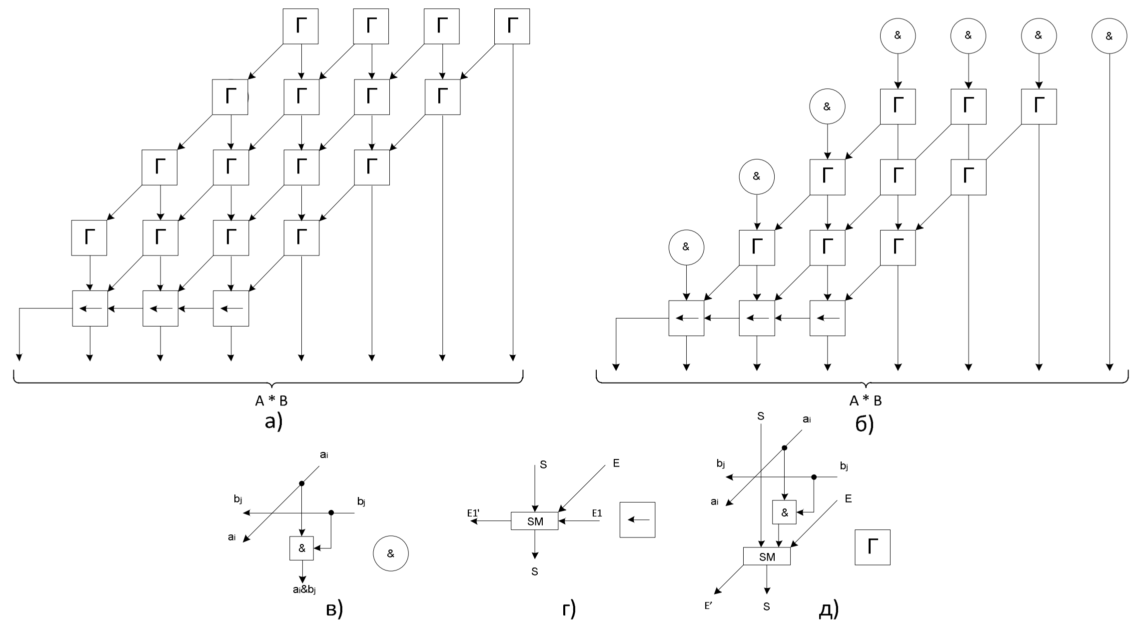


Рис.4. а – матричний перемножувач з діагональним перенесенням;
б – оптимізований матричний перемножувач з діагональним перенесенням;
в,г,д – внутрішні схеми комірок матричного перемножувача

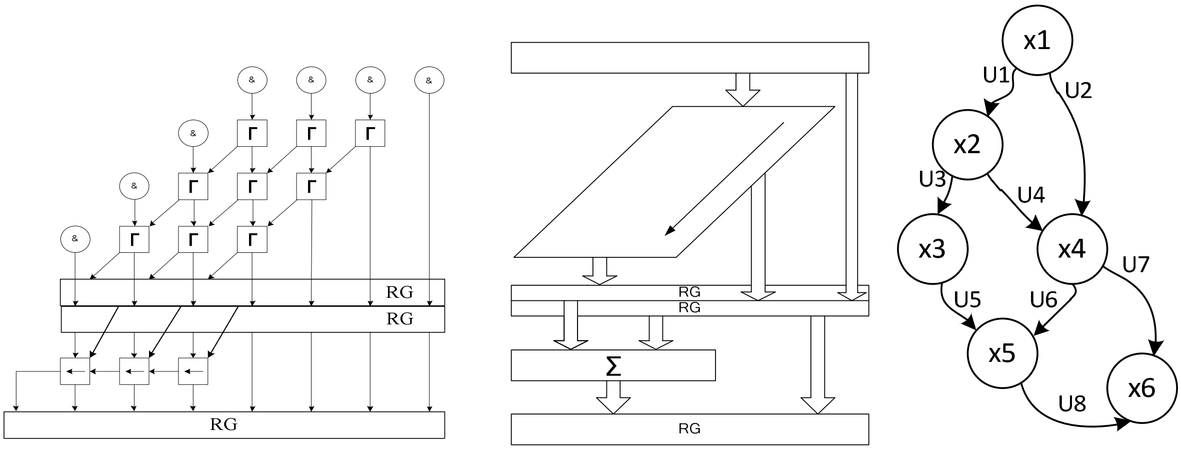
Схема (*рис. 4, а*) має надлишковість. Суматори у верхній та лівій частинах схеми не використовуються. На схемі рис. 4, б, продемонстровано можливу модифікацію схеми множення з діагональним перенесенням.

Характеристики складності оптимізованого пристрою множення з діагональним перенесенням: $P=0$, $L=2n-2$, $A=n^2-n$, $U=2n^2-1$, $S=14$. За характеристиками складності можемо зробити висновок, що за рахунок збільшення структурної складності пристрою було досягнуто зменшення часової, апаратної та зв'язкової складностей.

Проведені удосконалення матричних пристроїв множення не дали змоги отримати часову складність одного багаторозрядного суматора, тому наступним кроком зменшення часової складності пристрою множення з діагональним переносом може бути конвеєрна організація пристрою.

Конвеєрний пристрій множення з діагональним перенесенням

Двоступеневий конвеєрний варіант матричного пристрою множення з діагональним перенесенням зображено на *рис. 5, а*. Схему поділено двома регістрами по горизонталі між матрицею комірок Гілда. Для кожної частини поділеної схеми часова складність однакова та дорівнює $L=n-1$. Апаратна складність такого пристрою множення збільшиться за рахунок доданих конвеєрних регістрів, тобто $A=n^2+4n-2$.



а *б* *в*

Рис. 5. а – схема; б – блок-схема; в – граф блок-схеми, конвеєризованого модифікованого матричного пристрою множення з діагональним перенесенням

Для обчислення структурної складності розбиваємо схему на однорідні блоки, як зображено на *рис. 5, б*. Такий метод полегшує обчислення структурної складності. На *рис. 5, в* зображено граф схеми конвеєризованого пристрою множення з діагональним перенесенням.

Матриця інциденцій графу (*рис.5в*)

	u1	u2	u3	u4	u5	u6	u7	u8
x1	1	1						
x2	-1		1	1				
x3			-1		1			
x4		-1		-1		1	1	
x5					-1	-1		1
x6							-1	-1

Структурну складність обчислюємо за виразом [1]:

$$S = -E \cdot \log_2 \frac{E}{x \cdot u}, \tag{2}$$

де E – кількість елементів матриці інциденцій системи; $x{\cdot}u$ – розмір матриці.

Отже, використовуючи вираз (2) і матрицю інциденцій *(див. таблицю)*, можемо обчислити структурну складність пристрою множення (*рис. 5, а*) *S=25.3*. За рахунок збільшення структурної та апаратної складностей було зменшено часову складність до того рівня, який нам був потрібен. Зауважимо, що часова складність матричного конвеєрного пристрою множення не пов'язана з довжиною конвеєрних регістрів, вона дорівнює *n-1*.

Схема швидкого зсуву

Кінцевим блоком пристрою згортки є схема швидкого зсуву. Вона виконує роль запобіжника від перевантаження розрядної сітки. Схема дає змогу зсувати результат накопичення в бік молодших або старших розрядів. Діапазон зсування залежить від виконуваних задач та дорівнює одному або декільком розрядам операндів. Один з варіантів реалізації схеми – матриця множення. В ній множене це число, яке потрібно зсунути, множник – число із нульовими розрядами, крім одного. Розряд, що дорівнює одиниці, задає величину зсуву відносно заданого.

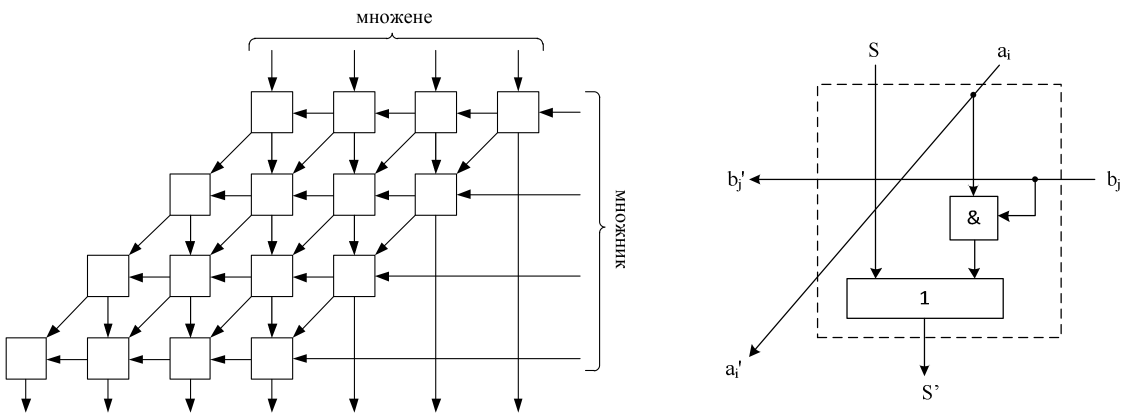


Рис. 6. а – фрагмент матриці схеми швидкого зсуву; б – внутрішня схема комірки

Комірка матриці (*рис. 6, б*) реалізована на двох зв'язаних логічних вентилях: ***і*** та ***або***. Часова складність одної комірки дорівнює часовій складності одного логічного елемента ***або*** ($\ell_{або}$). Вона менша ніж часова складність одного елемента багаторозрядного суматора: $\ell_{або} \approx \ell_{\Sigma}$. Фрагмент матриці показаний на рисунку (*рис. 6, а*). Видно, що при діапазоні зсуву ± ***n/2*** розрядів характеристики складності мають такі значення: $L_З = n/2$; $A = n^2$; $P = 0$; $S = 0$. Схема зсуву задовольняє вимозі за часовою складністю, оскільки $L_{1/2M} \approx n-1$ а $L_{\Sigma} = n$, тому $L_З < L_{\Sigma}$.

Аналіз суміщення алгоритмів на одній структурі

Наступний крок – аналіз сумісності алгоритмів (функцій) за складом арифметичних операцій та їх черговістю у функціональній залежності (за алгоритмом). Наприклад, згортка та ШПФ містять операції множення та сумування/віднімання та черговість їх виконання: спочатку множення, потім сумування. Тобто згортка та ШПФ сприятливі для послідовного опрацювання. Аналіз сумісності проводиться для всього списку алгоритмів. Не для всіх груп алгоритмів сумісність за характеристиками складності прийнятна та дає позитивний результат. У такому випадку доцільно виділити групи із суміщеними алгоритмами і для цих груп провести синтез реконфігурованих апаратних процесорів (RH процесорів).

Висновки

1. Сформульовано умови для структурного синтезу високопродуктивних конвеєрних арифметичних пристроїв на основі характеристик складності H-моделі алгоритму;
2. Обгрунтовано доцільність використання характеристики складності для параметричної оптимізації сходинок конвеєрних трактів;
3. На основі аналізу і оптимізації структурної складності синтезований двосходинковий конвеєр множення із затримкою на виході не більшою, ніж затримка на багаторозрядному суматорі.

1. Черкаський М.В., Мурад Хусейн Халіл. Універсальна SH-модель // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2004. – № 523. – С. 150–154. 2. Вишенчук И.М., Черкасский Н.В. Алгоритмические операционные устройства и супер ЭВМ. – К.: Техника, 1990.